

مقاله پژوهشی

مطالعه مقایسه‌ای اثر افزودن دو نانوذره SiO_2 و TiO_2 در فرآیند جوشکاری لوله‌های گاز به روش SMAW با بکارگیری روش تجربی و مدلسازی توسط نرم‌افزار Abaqus

احمد حسین علی‌الجانبی^۱ و سید علیرضا موسوی شیرازی^{۲*}

۱- گروه مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه فیزیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

چکیده

در این تحقیق، اثرات افزوده شدن دو نانوذره SiO_2 و TiO_2 به فیلرهای جوشکاری در حین فرآیند جوشکاری قوس فلزی محافظ (SMAW) بر خواص مکانیکی محل اتصال و میزان مقاومت خمشی و کششی لوله‌های گاز جوشکاری شده به دو صورت تجربی و نیز مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Abaqus بررسی شد. آزمون‌های تجربی مورد مطالعه در این تحقیق نیز شامل آزمون کشش تک محوری و خمش سه نقطه‌ای بود که این آزمون به ازای مقادیر مختلف نانوذره در طی فرآیند جوشکاری برای هر نمونه انجام شد. برای هر نانوذره سه سطح غلظتی شامل ۱، ۲/۵ و ۵٪ جرمی استفاده شد. به منظور بررسی اثر نوع نانوذره، غلظت‌شان و نیز اثرات متقابل‌شان بر بیشینه بار خمشی و همچنین بیشینه خمش نمونه، آزمون تجزیه واریانس انجام شد. جهت تعریف خواص ناحیه جوش و تعریف نانوذرات با غلظت‌های جرمی مختلف در فرآیند مدلسازی عددی از روش المان نماینده حجم استفاده شد. پس از تعریف خواص نهایی المان نماینده حجم (RVE)، از این خواص در تعریف خواص نهایی ناحیه جوش استفاده و فرآیند خمش و کشش در لوله گاز تعریف شد. نتایج این تحقیق به دو صورت نتایج تجربی و نتایج مدلسازی عددی به روش المان محدود ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان داد تأثیر نوع نانوذره بر بیشینه بار خمشی وارده بر لوله جوشکاری شده معنادار نبود اما اثر غلظت نانوذره معنادار شد که بیشینه کرنش جانبی به ازای دو عامل غلظت و درصد نانوذره و کمینه کرنش جانبی نیز به ازای ۵٪ جرمی نانوذره SiO_2 مشاهده گردید. نتایج نشان داد که با افزوده شدن نانوذره به فیلر جوشکاری، میزان مقاومت خمشی نمونه‌های مدلسازی شده نیز افزایش می‌یابد که این موضوع با نتایج بدست آمده از آزمون تجربی نیز مطابقت دارد ولی با افزایش بیش از ۲/۵ درصد نانوذره در فیلر، نتایج تجربی نشان داد که به دلیل کلوخه‌ای شدن نانوذرات در جوش و ایجاد فضاهای پوک، میزان مقاومت خمشی کاهش می‌یابد اما در نتایج مدلسازی عددی چنین موردی مشاهده نشد و به ازای مقادیر بیش از ۵٪ نانوذره در فیلر جوشکاری، میزان مقاومت خمشی دوباره افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری، روش تجربی، لوله، مدلسازی، نانوذره.

۱- مقدمه

مهم است. این قابلیت‌ها باعث شده که نقش فولاد در صنعت و ساختمان بسیار پررنگ باشد [۱]. لوله گاز برای انتقال گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد که این انتقال گاز می‌تواند شامل مصارف خانگی یا صنعتی باشد. لوله گاز بر اساس جنس،

خواصی نظیر استحکام، مقاومت در برابر خوردگی و قابلیت جوشکاری فولاد در طراحی و ساخت قطعات صنعتی بسیار

* عهده‌دار مکاتبات: محمد سید علیرضا موسوی شیرازی

نشانی: تهران، خیابان پیروزی، بلوار ابوذر، خیابان شهید ده حقی

تلفن: ۰۲۱-۳۳۰۶۰۹۰۹، دورنگار: ۰۲۱-۳۳۰۶۰۹۰۹، پست الکترونیکی: a_moosavi@azad.ac.ir

نوع استاندارد و روش تولید، انواع مختلفی دارد که هر کدام بسته به خواص که ارائه می‌دهد، در مصارف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در مصارف ساختمانی و در بخش لوله کشی گاز خانگی، از لوله‌های فولادی به دلیل قابلیت بالا در جوشکاری بطور ویژه استفاده می‌شود. خواص مکانیکی و ریز ساختار ناحیه جوش در لوله‌های گاز از اهمیت زیادی برخوردار هستند. از این رو، امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌های ابداع فرآیندهای جوشکاری نوین و بهبود عملکرد و عمر کاری قطعات جوشکاری شده صورت گرفته است [۲،۳]. نفوذ جوش یکی از مشخصه‌های کیفیت جوش می‌باشد که نقش مهمی در ظرفیت تحمل تنش در اتصالات جوشی دارد. همچنین خستگی مساله بسیار حساسی است که می‌تواند منجر به شکست محل جوش تحت نیروی سیکلی گردد [۴]. این موضوع می‌تواند در تنش‌هایی کمتر از تنش تسلیم مواد رخ دهد و در نتیجه عمر مفید قطعه را کاهش دهد. افزایش تنش باعث شروع ترک و متعاقباً شکست خستگی می‌شود [۵]. در اثر جوشکاری، نقاط جوشکاری شده و منطقه حرارت دیده مجاور جوش، ترد و شکننده می‌شوند. هنگامی که این مناطق تحت نیروهای دینامیکی قرار می‌گیرند، منجر به شکست ناگهانی می‌شوند. لذا افزودن نانوذرات در امر استحکام بخشی و میزان مقاومت ناحیه جوش می‌تواند بسیار مفید و مؤثر واقع گردد. از طرفی اضافه نمودن نانوذرات، دانه‌های مناطق مجاور جوش در فولاد را ریزتر کرده که این امر موجب افزایش چقرمگی جوش می‌شود [۶].

فرآیند SMAW معمول‌ترین فرآیند جوشکاری قوسی است که حدود ۵۰٪ جوشکاری‌ها با این فرآیند انجام می‌شوند [۷،۸]. این فرآیند به علت انعطاف زیاد و قابلیت استفاده در همه موقعیت‌ها و ضخامت‌های مختلف، قابل توجه است. ۹۹٪ مصارف این فرآیند به صورت دستی است و در سطح محدودی از یک روش اتوماتیک به نام جوشکاری ثقلی استفاده می‌شود [۹،۱۰]. با تغییر نوع الکتروود و جریان و بسته

به مهارت جوشکار، این فرآیند در تمام موقعیت‌ها قابل استفاده است [۱۱]. این فرآیند عمدتاً برای جوشکاری انواع فولادها به کار رفته و در برخی موارد نیز برای جوشکاری نیکل و آلیاژهای آن استفاده می‌شود [۱۲]. برخی از آلیاژهای مس نیز با این روش، جوشکاری می‌شوند ولی آلومینیوم به ندرت با این روش جوش داده می‌شود [۱۳،۱۴]. فرآیند SMAW (Shielded Metal Arc Welding) روش مؤثری برای جوشکاری غیرآهنی نیست [۱۵]. تست کشش که با عنوان تست تنش نیز شناخته می‌شود، اساسی‌ترین نوع آزمون مکانیکی است که می‌توان روی یک ماده انجام داد [۱۶]. به زبان ساده در این تست با کشیدن ماده توسط فک‌های دستگاه کشش، می‌توان واکنش آن را در برابر نیروهای اعمالی تعیین نمود [۱۷]. استاندارد ASTM D ۳۰۳۹ با عنوان روش آزمون استاندارد برای مشخصات کششی مواد مختلف، برای تعیین مشخصات مکانیکی استفاده می‌شود [۱۸]. این روش آزمون برای بدست آوردن مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و ازدیاد طول نهایی نمونه و برای استفاده در تست‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است [۱۹،۲۰]. تست خمش آزمایشی برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد است که در آن، مقاومت قطعه در برابر خم شدگی و شکستن مورد آزمایش قرار می‌گیرد [۲۱،۲۲]. در تحقیقات اخیر، بهبود چشمگیر خواص مکانیکی مواد جوشکاری در اثر ترکیب نانوفازهای مختلف با مواد فیلر اتصالات جوش صورت گرفته است. به عنوان نمونه، یک تکنیک جدید برای بهبود خواص قطعات جوش آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با استفاده از نانوذرات Al_2O_3 ارائه شده است. بدین منظور، فلزات دارای جوش یکطرفه با استفاده از جوش قوسی تنگستن - گاز و با فیلرهای حاوی مقادیر مختلف از ذرات نانویی Al_2O_3 تهیه شده و در فرآوری اصطکاکی اغتشاشی ساخته شده‌اند که برای دستیابی به توزیع یکنواختی از ذرات نانویی Al_2O_3 ، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در منطقه جوشکاری اعمال شده است [۲۳،۲۴].

نوآوری‌ها و یافته‌های این تحقیق عبارتند از اینکه: افزوده شدن نانوذره به فیلر جوشکاری با غلظت ۲/۵٪، بالاترین مقاومت خمشی برای لوله‌های جوشکاری شده را ایجاد میکند. نوع نانوذره و غلظت آن در سطح، بر بیشینه مقاومت کششی لوله‌های جوشکاری شده تأثیرگذار است ولی مناسب‌ترین فیلر برای داشتن بیشینه مقاومت خمشی و کششی در لوله‌های جوشکاری شده، فیلر حاوی ۲/۵٪ نانوذره SiO_2 می‌باشد. همچنین، با افزایش غلظت نانوذره در فیلر جوشکاری به بیش از ۲/۵٪، مقاومت کششی و خمشی لوله‌های جوشکاری شده ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و همچنین در این تحقیق یافت شد که اثر نانوذرات SiO_2 در بهبود مقاومت کششی لوله‌های جوشکاری شده، بیشتر از نانوذرات TiO_2 می‌باشد [۳۳، ۳۴].

۲- فعالیت‌های تجربی

با توجه به اینکه سطح لوله گاز مورد استفاده در این تحقیق شامل ناخالصی، زنگ‌زدگی، گرد و خاک و مواد اضافی است و این مواد در کیفیت نهایی جوشکاری تأثیرگذار است لذا در این بخش، نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده و آب صابون تمیزکاری شدند. برای این منظور ابتدا سطح نمونه‌های برش داده شده توسط کاغذ سنباده نمره ۸۰۰ و نمره ۲۰۰۰ بطور کامل، سنباده‌زنی شدند. بعد از اتمام این عملیات، نمونه‌ها توسط آب صابون شستشو داده شده و در نهایت توسط سشوار خشک شدند. در شکل ۱، نمونه‌ها قبل و بعد از تمیزکاری نشان داده شده است.



(a) قبل از تمیزکاری

(b) بعد از تمیزکاری

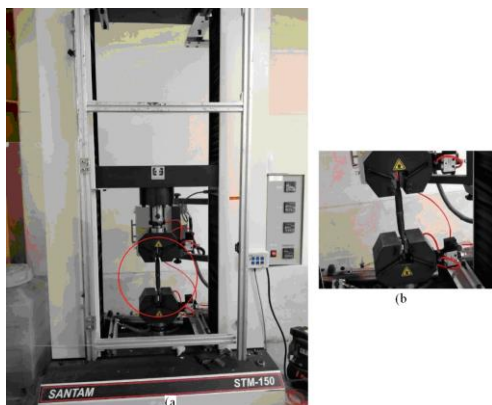
شکل ۱: نمونه‌های آماده شده برای جوشکاری

(a) قبل از تمیزکاری و (b) بعد از تمیزکاری.

در تحقیقی دیگر، ذرات نانو آلومینا به عنوان تقویت کننده برای تولید کامپوزیت سطحی آلومینیوم ۶۰۸۲ به روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بکار گرفته شد [۲۵].

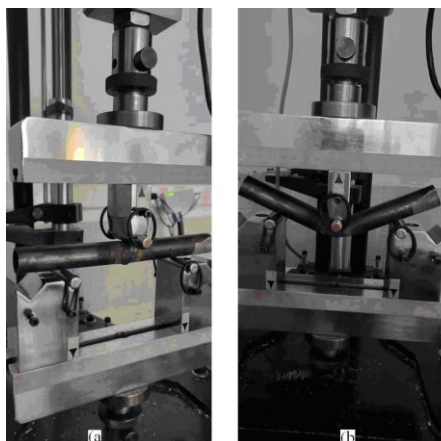
در تحقیقی دیگر، از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای انجام اتصال لب به لب آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ و تولید همزمان نانو کامپوزیت Al-ZrO_2 در محل اتصال استفاده شد. بطوریکه متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف مورد بررسی قرار گرفت تا نمونه‌ای که از نظر ظاهری بی‌عیب و بیشترین استحکام کششی را داشته باشد بدست آید. سپس با اضافه کردن نانوذرات زیرکونیا به بررسی خواص مکانیکی و سایش نمونه‌های جوشکاری شده پرداخته شد [۲۶، ۲۷]. همچنین در یک پژوهش به بررسی اثرات نانو ذرات بر خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلومینیوم پرداخته شده است [۲۸]. در این تحقیق، نانو ذرات مس در غلظت‌های مختلف حجمی به کار گرفته شد که نتایج این پژوهش نشان داد که وجود نانوذرات مس سبب افزایش استحکام نهایی و افزایش سختی جوش می‌گردد. در تحقیقی دیگر، اثرات نانوذرات Cu_2O بر خواص جوش مورد بررسی قرار گرفت [۲۹]. در این تحقیق، نانوذرات به صورت پوششی بر سطح فلز و به منظور پر کردن درز جوش به کار گرفته شد.

در این تحقیق، به منظور مدلسازی فرآیند کشش و خمش در لوله جوشکاری شده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus (آباکوس) استفاده شده است. Abaqus مجموعه کاملی از حل کننده‌های قدرتمند المان محدود برای تجزیه و تحلیل غیر خطی مسائل مهندسی است که طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی را پوشش می‌دهد [۳۰]. این نرم‌افزار، راه حل‌های قدرتمند، مستحکم و سریعی را برای مسائل مهندسی معمولی و واقعی ارائه می‌دهد که شامل دینامیک، استاتیک، ضربه-برخورد، تجزیه و تحلیل شکست-خستگی، کشش و خمش است. یکی از متداول‌ترین برنامه‌های تجاری روش المان محدود (Finite Element Method) که در حوزه بیومکانیک استفاده می‌شود نرم افزار Abaqus می‌باشد [۳۱، ۳۲].



شکل ۴: آزمون کشش تک محوری.

استانداردهای معمول مورد استفاده در آزمون خمش ASTM E۲۹۰ و ASTM E۸۵۸ هستند. این آزمون معمولاً به دو صورت سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای انجام می‌شود. سمبه دستگاه یونیورسال برای اجرای تست خمش، با سرعت مشخصی که معمولاً بین ۱۰ تا ۱۱ mm/min است به سمت قطعه مورد آزمون حرکت می‌کند. در حالت سه نقطه‌ای، قطعه مورد آزمون روی پایه‌ای که دارای دو قسمت به عنوان تکیه گاه است، قرار گرفته و نیرو از طریق سمبه به وسط قطعه اعمال می‌گردد. در این پژوهش، در روش تجربی برای انجام تست کشش و خمش از دستگاه ستام STM-۱۵۰ استفاده شد که برای تغییر نوع تست فقط فک های دستگاه تعویض شد. در شکل ۵، این دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۵: آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه ستام STM-۱۵۰.

به منظور اتصال لوله‌های گاز از روش جوشکاری قوس فلزی محافظ (SMAW) استفاده شد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر برای انجام جوشکاری به الکتروود نیاز است. لذا در این تحقیق از الکتروود سلولزی ایساب برای جوشکاری لوله با استاندارد E۶۰۱۰ ساخت کشور پرزیل استفاده شد. به منظور توزیع یکنواخت نانوذرات در سطح جوش، قبل از انجام عملیات جوشکاری، روغن لحیم کاری در محل اتصال جوش مالیده شد به طوری که برای هر نمونه از جوش، میزان ۱۰g نانوروغن لحیم کاری استفاده شد. این دو نانوذره در روغن لحیم کاری توسط روش همزدن آلتراسونیک پراکنده سازی شد [۳۵]. در شکل ۲، نحوه قرار دادن نانو فیلر در محل اتصال و در شکل ۳، نمونه‌های جوش کاری شده نشان داده شده است.



شکل ۲: روش مالیدن نانوفیلر بر سطح اتصال.



شکل ۳: نمونه‌های جوشکاری شده.

آزمون کشش راهی ساده و ارزان برای ارزیابی کیفیت مواد به شمار می‌رود. در شکل ۴، این دستگاه نشان داده شده است.

از آنجائیکه خواص مکانیکی و فیزیکی فلز لوله در سرتاسر طول لوله و در همه مدل‌ها یکسان بوده ولی خواص ناحیه فلزی جوش به ازای نانوذرات مختلف و همچنین با تغییر غلظت نانوذره تغییر می‌کند رشد دانه‌ها در ناحیه فلز و در حالت بدون عملیات حرارتی به صورت محوری است که با افزایش زمان اعمال عملیات حرارتی، رشد محوری محدود گردیده و مرزدانه‌ها گسترش می‌یابد و باعث کاهش سائز دانه بندی می‌گردد. در تست کشش و تنش، برای مشخصات کششی مواد مختلف با کشیدن ماده توسط فک‌های دستگاه، واکنش آن در برابر نیروهای اعمالی تعیین گردیده و برای بدست آوردن مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و ازدیاد طول نهایی نمونه در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق، علاوه بر روش تجربی که بعد از انجام جوشکاری برای هر نمونه انجام شد، به منظور مدل‌سازی المان محدود آزمون کشش و خمش در لوله جوشکاری شده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus استفاده شده است [۳۶]. نرم‌افزار Abaqus شامل ماژول‌های مختلفی است که هر کدام وظایف خاصی در فرآیند مدل‌سازی را بر عهده داشته و در مدل‌سازی این تحقیق و تعریف لوله و جوش استفاده شده است [۳۷].

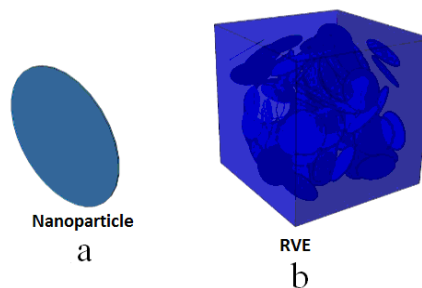
در طول مدل‌سازی فرآیند کششی و خمشی در لوله گاز، دو بخش اصلی وجود دارد که شامل تعریف فلز جوش و فلز لوله می‌شود. خواص مکانیکی و فیزیکی فلز لوله در سرتاسر لوله و در همه مدل‌ها یکسان است اما خواص ناحیه فلزی جوش به ازای نانوذرات مختلف و همچنین با تغییر غلظت نانوذره تغییر می‌کند [۳۸]. به منظور تعریف اثرات نانوذرات در فرآیند مدل‌سازی عددی از روش المان نماینده حجم یا RVE استفاده شد. روش RVE یک روش عددی است که برای مدل‌سازی و تحلیل خواص مکانیکی مواد استفاده می‌شود. در این روش، یک حجم کوچک از ماده به عنوان نماینده حجم انتخاب می‌شود و خصوصیات آن به عنوان خصوصیات کلی ماده در نظر گرفته می‌شود [۳۹]. برای

استفاده از روش RVE، ابتدا باید یک نماینده حجم مناسب برای ماده انتخاب شود. سپس با استفاده از روش المان محاسبات عددی بر روی نماینده حجم صورت می‌گیرد. در نهایت، خصوصیات کلی ماده با تحلیل داده‌های به دست آمده از نماینده حجم تعیین می‌شود [۴۰].

با توجه به توضیحات فوق، در این تحقیق جهت تعریف خواص ناحیه جوش به ازای نانوذرات مختلف و غلظت‌های جرمی مختلف از روش RVE استفاده شد. با توجه به اینکه خواص مکانیکی و فیزیکی نانوذرات شامل چگالی، جرم مولکولی، نسبت پواسون، مدول یانگ، اندازه نانوذرات و غلظت نانوذرات در ناحیه جوشکاری، به ازای هر حالت مختلف باهم تفاوت دارد لذا در حین تعریف RVE، هر یک از این خواص به طور جداگانه تعریف می‌شود [۴۱]. همچنین در میان سایر ویژگی‌های مؤثر بر خواص RVE، نسبت قطر نانوذرات به ضخامت RVE نیز یک مشخصه مهم در تعریف نانوذرات در RVE است. در طی فرآیند تعریف RVE، تمام ویژگی‌های فوق برای RVE در نظر گرفته می‌شود که بر خواص نهایی ناحیه فلز جوش تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که هر ویژگی برای هر نوع نانوذره متفاوت است، بنابراین با تعریف مقادیر مربوط به هر نوع نانوذره، RVE تعریف شده دارای خواص منحصر به فردی برای همان نانوذره است. به عبارت دیگر، معیار تمایز بین انواع نانوذرات با تعریف خواص فیزیکی و هندسی نانوذرات در RVE تعریف می‌شود [۴۲، ۴۳]. با توجه به متفاوت بودن هر ویژگی برای هر نوع نانوذره، المان نماینده حجم تعریف شده دارای خواص منحصر به فردی برای همان نانوذره است که بر خواص نهایی ناحیه فلز جوش تأثیر می‌گذارد. بعد از اینکه خواص نهایی RVE تعریف شده محاسبه شد، از این خواص در تعریف خواص نهایی ناحیه جوش، استفاده شده و فرآیند خمش و کشش در لوله گاز تعریف می‌شود. در شکل ۶، روش یک نمونه تعریف شده از RVE در حضور نانوذرات نشان داده شده است [۴۴].

جدول ۲: مقایسه میانگین بیشینه نیروی خمشی و کرنش جانبی لوله‌های جوشکاری شده به ازای دو نانوذره SiO_2 و غلظتشان.

نوع نانوذره	غلظت نانوذره (%)	بیشینه نیروی خمشی (kN)	بیشینه خمش نمونه (mm)
SiO_2	۰	۹۸۳۰/۴	۳۴/۶۰
	۱	۱۱۸۷۱/۷	۳۶/۹۷
	۲/۵	۱۲۹۲۹/۶	۲۴/۹۳
	۵	۹۴۱۸/۶	۱۸/۱۷
TiO_2	۱	۱۱۶۴۳/۳	۳۲/۴۳
	۲/۵	۱۲۶۳۰/۴	۳۹/۳۰
	۵	۹۰۴۸/۶	۱۹/۲۷



شکل ۶: فرآیند تعریف نانوذرات در RVE.

۳- نتایج و بحث

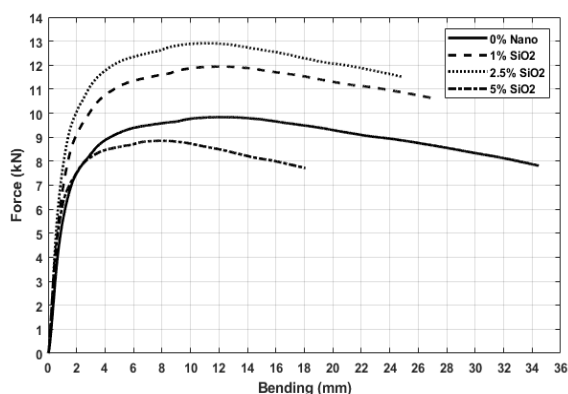
آزمون‌های تجربی مورد مطالعه در این تحقیق شامل آزمون کشش تک محوری و خمش سه نقطه‌ای بود که این آزمون به ازای مقادیر مختلف نانوذره در طی فرآیند جوشکاری برای هر نمونه انجام شد. برای هر نانوذره، سه سطح غلظتی شامل ۱٪، ۲/۵٪ و ۵٪ جرمی استفاده شد. یک نمونه هم به عنوان شاهد بدون نانوذره انجام شد.

به منظور بررسی اثر نوع نانوذره، غلظت آن و اثرات متقابل آنها بر بیشینه بار خمشی و همچنین بیشینه خمش نمونه، آزمون تجزیه واریانس انجام شد. در جدول ۱، نتایج تجزیه واریانس اثر نوع نانوذره، غلظت آن و اثر متقابل آنها بر بیشینه نیروی خمشی و کرنش جانبی لوله‌های جوشکاری شده ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد تأثیر نوع نانوذره بر بیشینه بار خمشی وارده بر لوله جوشکاری شده معنادار نبود اما اثر غلظت نانوذره بر آن در سطح، معنادار شد. مقدار اثر متقابل نوع نانوذره ضربدر غلظت آن نیز بر بیشینه نیروی خمشی لوله جوشکاری شده معنادار نبود.

جدول ۱: تجزیه واریانس اثر نوع نانوذره، غلظت آن و اثر متقابل آن‌ها بر بیشینه نیروی خمشی و کرنش جانبی لوله‌های جوشکاری شده.

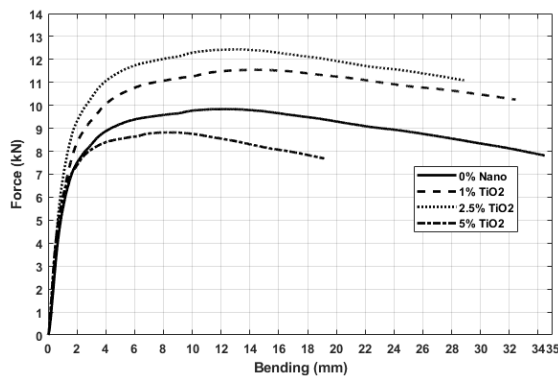
بیشینه خمشی (mm^2)	بیشینه نیروی خمشی (N^2)	درجه آزادی	منبع تغییرات
۹۶/۷۴۸	۵۵۳۴۲۸۶	۹	مدل اصلاح شده
۱۸۱۹۴/۰	۲۸۵۱۶۷۱۰۳	۱	رنگبری
-/۱۲۵	۱۲۳۳۹۸	۲	تکرار
۴۴/۸۳۷	۳۰۲۱۹۹	۱	نوع نانوذره
۲۵۷۰/۷۹	۱۶۳۸۱۹۳۶	۳	غلظت نانوذره (%)
۱۰/۱۳۹	۳۸۵۹۰	۳	نوع نانوذره و غلظت آن (%)
-/۵۰۳	۱۲۱۴۹۴	۱۴	خطا

تغییرات میزان بیشینه مقاومت خمشی و کرنشی جانبی در لوله‌های جوشکاری شده تحت آزمون خمش، منحنی نیرو-تغییر مکان برای غلظت‌های مختلف نانوذرات SiO_2 در شکل ۷ نمایش داده شده است. بررسی شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوذرات SiO_2 از ۰٪ تا ۵٪، میزان بیشینه مقاومت خمشی نمونه‌های تحت آزمون، ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرد به طوری که در غلظت ۲/۵٪ جرمی SiO_2 بیشینه مقاومت خمشی به مقدار $24/96 \text{ MPa}$ مشاهده شد. با افزایش غلظت نانوذره به بیش از ۲/۵٪، روند افزایش مقاومت خمشی به شیب تندی شروع به کاهش کرد به طوری که مقدار آن حتی از نمونه بدون نانوذره نیز کمتر شد. از طرفی با افزایش غلظت نانوذره در فیلر، میزان کرنش جانبی بیشینه نمونه‌ها کاهش یافت به طوری که کرنش جانبی نمونه بدون نانوذره حدود $17/3\%$ مشاهده شد این در حالی است که این مقدار برای نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲/۵٪ و ۵٪ به ترتیب برابر با $13/48\%$ ، $12/46\%$ و $9/1\%$ بود.



شکل ۷: منحنی آزمون خمش سه نقطه‌ای در لوله‌های گاز جوشکاری شده به ازای نسبت‌های جرمی مختلف نانوذرات SiO_2 .

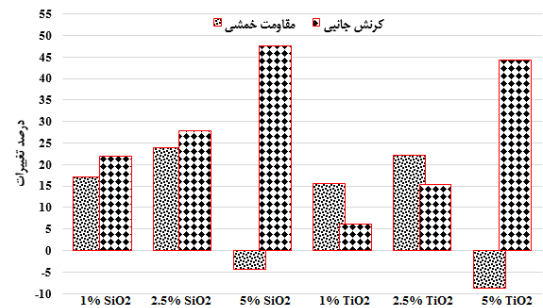
مقاومت خمشی نمونه های حاوی نانوذره SiO_2 به ترتیب ۱/۹۲، ۲/۳۱ و ۳/۹۳٪ بیشتر از نمونه های حاوی نانوذره TiO_2 می باشد. بررسی کرنش بیشینه جانبی نیز نشان می دهد که اثر نانوذره TiO_2 در کاهش میزان کرنش جانبی نمونه ها کمتر از نانوذره SiO_2 است به طوری که در شرایط مشابه غلظتی نانوذره، به ازای غلظت های ۱٪، ۲/۵٪ و ۵٪، میزان کرنش جانبی نمونه های حاوی TiO_2 به ترتیب ۱۶/۸۳٪، ۱۴/۹۱ و ۵/۷۱٪ بیشتر می باشد. بنابراین، وجود نانو ذرات در حوضچه جوش، دانه های مناطق مجاور جوش را ریزتر کرده و توزیع یکنواختی از مراکز مستعد برای جوانه زنی در فلز جوش ایجاد می نماید. لذا با افزایش درصد جوانه زنی، خواص مکانیکی جوش افزایش چشمگیری در مقایسه با جوش بدون نانوذرات خواهد داشت.



شکل ۹: منحنی آزمون خمشی سه نقطه ای در لوله های گاز جوشکاری شده به ازای نسبت های جرمی مختلف نانوذرات TiO_2 .

نتایج ارائه شده در این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت نانوذره در فیلر جوشکاری، میزان مقاومت کششی و خمشی نمونه های جوشکاری شده افزایش و سپس کاهش پیدا کرد. در ابتدا وجود نانوذرات در حوضچه ذوب سبب ایجاد پیوند قوی بین مواد الکتروود و فلز پایه لوله است که این افزایش پیوند تا ۲/۵٪ جرمی نانوذره مشاهده شد اما با افزایش نانوذرات از حد مشخصی، نانوذرات به هم چسبیده و مانند کلوخه هایی در حوضچه ذوب رفتار شده و سبب کاهش خواص مکانیکی جوش به خصوص مقاومت کششی و خمشی جوش می شود.

در شکل ۸، تغییرات مقاومت خمشی و کرنشی جانبی به ازای غلظت های مختلف SiO_2 در مقایسه با نمونه بدون نانوذره نشان داده شده است.

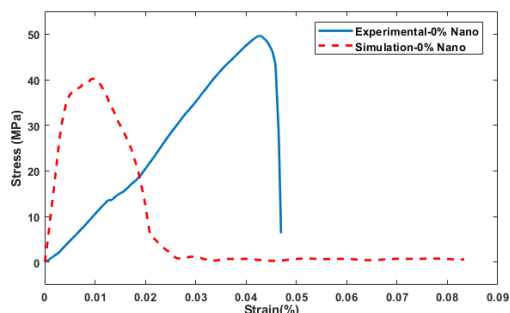


شکل ۸: مقایسه تغییرات مقاومت خمشی و کرنش بیشینه جانبی نمونه های مختلف با نمونه بدون نانوذره.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشینه نیروی خمشی به ازای ۲/۵٪ غلظت نانوذره مشاهده شد. کمترین نیروی خمشی نیز به ازای ۵٪ غلظت نانوذره مشاهده گردید. نتایج مقایسه میانگین اثرات متغیرهای مستقل بر میزان بیشینه کرنش جانبی لوله تحت بار خمشی نشان داد که بیشینه کرنش جانبی به ازای غلظت ۱۰٪ نانوذره و کمینه کرنش جانبی نیز به ازای ۵٪ جرمی نانوذره SiO_2 مشاهده گردید. در شکل ۹، منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی برای نمونه های جوشکاری شده حاوی نانوذره TiO_2 ارائه شده است. در این حالت نیز مطابق حالت قبلی، با افزوده شدن نانوذره به فیلر و ناحیه جوش، میزان مقاومت خمشی نمونه افزایش و سپس کاهش یافت به طوری که مقاومت خمشی نمونه بدون نانوذره ۱۸/۹۸ MPa بود که با افزودن ۱٪، ۲/۵٪ و ۵٪ نانوذرات TiO_2 میزان مقاومت خمشی به ترتیب برابر با ۲۲/۴۷ MPa، ۲۴/۳۸ MPa و ۱۷/۴۶ MPa بود. از طرف دیگر، هر چه قدر غلظت نانوذره در فیلر افزایش یابد، میزان کرنش جانبی نمونه ها کاهش یافت.

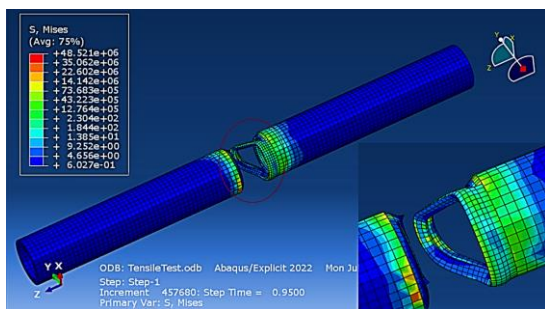
تحلیل نانویی استخراج شده نشان می دهد که اثر نوع نانوذره بر بیشینه مقاومت خمشی نمونه های تحت آزمون خمشی معنادار می باشد اما در شرایط مشابه غلظتی، اثر نانوذره SiO_2 در افزایش مقاومت خمشی بیشینه، بیشتر از نانوذره TiO_2 است به طوری که به ازای غلظت های ۱٪، ۲/۵٪ و ۵٪، میزان

ناحیه جوش و خواص لوله گاز براساس مصالح تشکیل دهنده آن‌ها تعریف شده اما در عمل چنین نیست زیرا ممکن است در طی آزمون کشش، با تغییر مرزخانه‌ها در آزمون تجربی، خواص مکانیکی نمونه تحت آزمون تجربی بهبود پیدا کند.

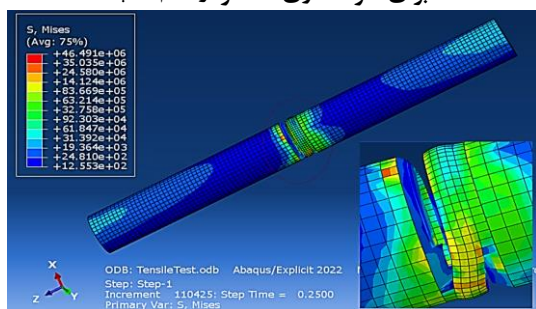


شکل ۱۱: مقایسه منحنی تنش-کرنش نمونه مدلسازی شده عددی و تجربی (بدون نانوذره).

در ادامه، نتایج مدلسازی عددی آزمون کشش برای لوله‌های جوشکاری شده با حضور نانوذرات با نسبت‌های جرمی مختلف نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نتایج آزمون کشش تک محوری برای لوله‌های جوشکاری شده با ۱٪ جرمی نانوذرات SiO_2 و TiO_2 نشان داده شده است.



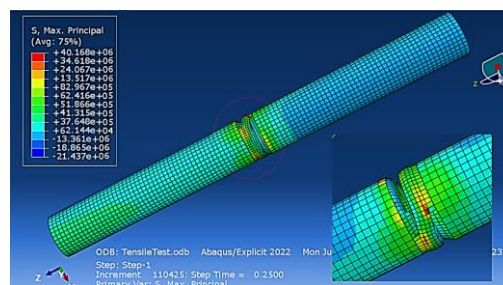
شکل ۱۲: نتایج آزمون کشش مدلسازی شده برای نمونه حاوی ۱٪ نانوذرات SiO_2 .



شکل ۱۳: نتایج آزمون کشش مدلسازی شده برای نمونه حاوی ۱٪ نانوذرات TiO_2 .

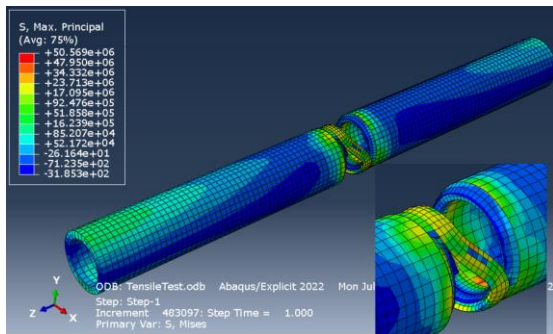
نتایج مدلسازی عددی توسط نرم افزار Abaqus به ازای لوله‌های مختلف جوشکاری شده با درصد‌های مختلف نانوذره در این بخش ارائه شده است که نتایج مدلسازی آزمون کشش و خمش در ادامه ارائه شده است.

در شکل ۱۰، نتایج مدلسازی المان محدود آزمون کشش نمونه جوشکاری شده نشان داده شده است. نتایج آزمون تجربی تست کشش نشان داد که میانگین مقاومت کششی نمونه‌های جوشکاری شده بدون نانوذره برابر با ۴۹/۶۵ MPa به دست آمد. این در حالی است که میزان بیشینه مقاومت خمشی نمونه مدلسازی شده برابر با ۴۰/۱۶ MPa به دست آمد. بررسی شکل ۱۰ نشان می‌دهد که بیشینه تنش کششی نمونه جوشکاری شده در محل اتصال جوش و لوله مشاهده شده است. در این حالت اختلاف بین مقاومت کششی نمونه تجربی و المان محدود برابر با ۱۹٪ است.

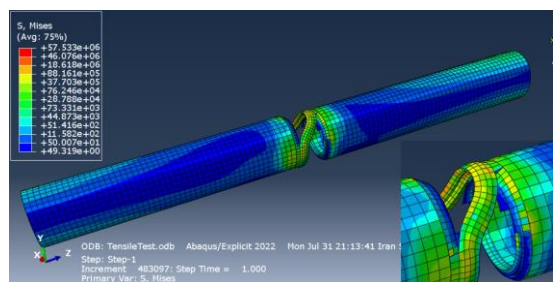


شکل ۱۰: نتیجه آزمون کشش برای نمونه جوشکاری شده بدون نانوذره.

در شکل ۱۱، منحنی تنش-کرنش برای نمونه تجربی و مدلسازی شده بدون نانوذره نمایش داده شده است. همانطور که در بالا توضیح داده شده، اختلاف بین بیشینه تنش رخ داده در نمونه آزمایشگاهی و مدلسازی شده حدود ۱۹٪ بود که این موضوع در منحنی تنش-کرنش نیز قابل مشاهده است. روند تغییرات تنشی-کششی در نمونه آزمایشگاهی و عددی مشابه هم است به طوری که ابتدا این تنش به صورت خطی افزایش یافته است و با شیب تندی کاهش یافته است اما بین نتایج عددی و تجربی برای مدلسازی کرنش، اختلاف زیادی بین نمونه تجربی و عددی مشاهده شد. این اختلاف می‌تواند ناشی از عدم تعریف نواحی متأثر از جوشکاری در طی فرآیند مدلسازی باشد. در طی فرآیند مدلسازی، خواص

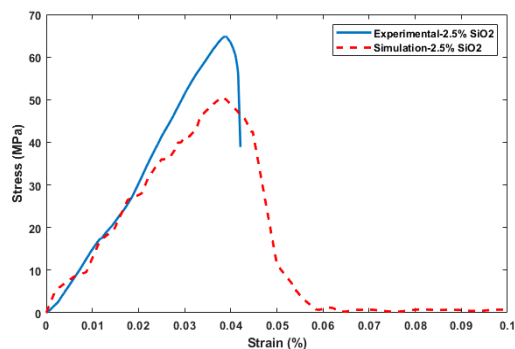


شکل ۱۴: نتایج آزمون کشش تک محوری مدلسازی شده برای نمونه حاوی ۲/۵٪ نانوذرات SiO_2 .



شکل ۱۵: نتایج آزمون کشش تک محوری مدلسازی شده برای نمونه حاوی ۲/۵٪ نانوذرات TiO_2 .

در شکل ۱۶، مقایسه منحنی تنش-کرنش برای مدل عددی و تجربی نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان تنش بیشینه کششی نمونه‌ها نسبت به حالت بدون نانوذره بیشتر بود. این موضوع با نتایج این تحقیق همراستاست و نشان می‌دهد نتایج آزمون‌های تجربی و مدلسازی عددی باهم مطابقت داشته و یک روند را نشان می‌دهند.



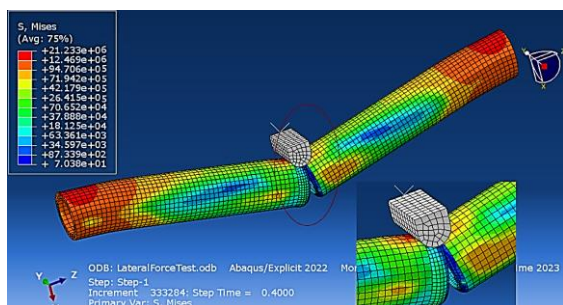
شکل ۱۶: مقایسه منحنی تنش-کرنش نمونه مدلسازی شده عددی و تجربی برای نمونه حاوی ۲/۵٪ از نانوذرات.

میزان بیشینه تنش کششی برای لوله های جوشکاری شده برای نمونه حاوی ۱٪ از TiO_2 و SiO_2 به ترتیب برابر با ۴۶/۴۹ و ۴۸/۵۲ MPa است. این نتایج در حالی بدست آمد که مقادیر بیشینه تنش کششی به ازای آزمون های تجربی برای نمونه های فوق به ترتیب برابر با ۵۲/۴۹ و ۵۹/۵۲ MPa بود. در این حالت خطای بین مقادیر مدلسازی شده و تجربی برای لوله های حاوی ۱٪ از TiO_2 و SiO_2 به ترتیب ۱۱/۴٪ و ۱۸/۴۸٪ بود.

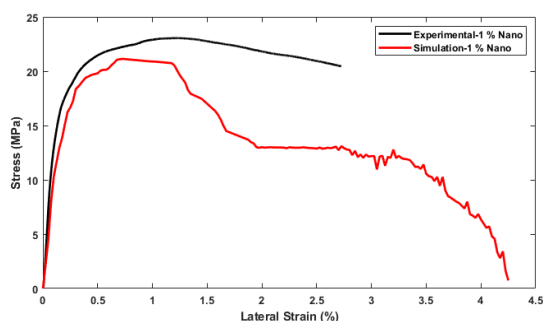
چون به منظور مدلسازی فرآیند کشش لوله های حاوی نانوذرات، از روش RVE استفاده شد و در طی فرآیند تعریف خواص RVE ها، از خواص نانوذرات استفاده شد و با توجه به اینکه مجموع خواص نانوذرات SiO_2 نسبت به TiO_2 بهتر بود، لذا این موضوع سبب بهبود خواص استخراجی برای جوش حاوی نانوذرات SiO_2 گردید و در نتیجه در شرایط مشابه بارگذاری، میزان تنش بیشینه قابل تحمل جوش حاوی SiO_2 به دلیل بیشتر بودن خواص مکانیکی آن، بیشتر شد.

در شکل های ۱۴ و ۱۵، نتایج آزمون کشش تک محوری لوله های جوشکاری شده به ازای ۲/۵٪ نانوذرات SiO_2 و TiO_2 نشان داده شده است. برای این دو حالت، میزان بیشینه مقاومت کششی مدلسازی شده توسط Abaqus برای نمونه ها به ترتیب برابر با ۵۰/۵۷ MPa و ۵۷/۵۳ MPa بود. در حالت افزوده شدن نانوذره به فیلر و مدلسازی جوشکاری، هر چقدر غلظت نانوذرات افزایش یافت میزان مقاومت کششی بیشینه لوله جوشکاری شده نیز افزایش یافت که این موضوع نیز با نتایج تجربی تحقیق حاضر همخوانی ندارد. در این تحقیق با افزایش غلظت نانوذره تا ۲/۵٪، میزان تنش بیشینه کششی افزایش و با افزایش غلظت به بیش از ۲/۵٪، میزان مقاومت کششی کاهش یافت. در حالت استفاده از فیلر ۲/۵٪ نانوذره SiO_2 ، میزان مقاومت کششی تجربی ۶۴/۷۹ MPa به دست آمد که در مقایسه با نمونه مدلسازی شده مقدار آن ۲۵/۱۱٪ اختلاف داشت.

مطابق شکل ۱۹، با افزودن ۱٪ نانوذره به فیلر جوشکاری، میزان مقاومت خمشی بیشینه در لوله جوشکاری شده به MPa ۲۱/۲۳۳ افزایش یافت که مقدار متوسط مقاومت خمشی به دست آمده از آزمون های تجربی در این حالت MPa ۲۲/۹۲ است که در این حالت میزان خطای مدلسازی ۷/۴۱٪ بود. در این حالت نیز منحنی تنش- کرنش برای مدل های تجربی و عددی تا ناحیه تغییر شکل الاستیک در یک راستا بوده و اختلاف بین آنها کم است اما در ناحیه تغییر شکل پلاستیک، این دو منحنی دچار واگرایی شدند.



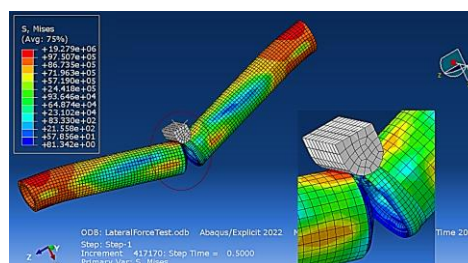
شکل ۱۹: نتایج آزمون خمش سه نقطه ای مدلسازی شده.



شکل ۲۰: مقایسه منحنی تنش- کرنش برای روش عددی و تجربی برای نمونه حاوی ۱٪ از نانوذرات.

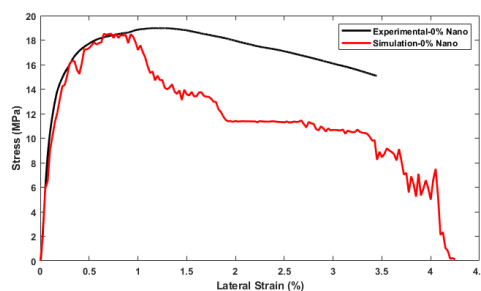
در شکل های ۲۱ و ۲۲، نتایج آزمون خمش سه نقطه ای برای لوله های جوشکاری شده با ۲/۵٪ نانوذرات TiO_2 و SiO_2 نشان داده شده است. مقادیر مقاومت خمشی لوله های جوشکاری شده به ترتیب، MPa ۲۲/۸۹ و MPa ۲۴/۰۸ می باشد که مقادیر تجربی برای این دو حالت برابر با MPa ۲۴/۹۶ و MPa ۱۸/۱۸ بوده که این نتایج نیز نشان داد که خطای مدلسازی به ازای نمونه های حاوی نانوذرات SiO_2 و TiO_2 به ترتیب برابر با ۸/۲۹٪ و ۲۴/۵٪ می باشد. بطور

در این بخش، نتایج مدلسازی شده برای آزمون خمش سه نقطه ای لوله گاز جوشکاری شده حاوی نانوذرات به ازای غلظت های مختلف نانوذره ارائه شده است. در شکل ۱۷، نتایج مدلسازی برای لوله جوشکاری شده بدون نانوذره نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با حرکت سنبه دستگاه تست خمش، نمونه تحت آزمون در محل اتصال جوش از هم جدا شده است و بیشینه مقاومت خمشی لوله جوشکاری شده در این حالت MPa ۱۹/۲۸ است. با توجه به اینکه نتایج تجربی نشان داد که متوسط مقاومت خمشی لوله های بدون نانوذره برابر با MPa ۱۸/۹۸ است لذا نتیجه گرفته می شود که خطای مدلسازی در این حالت ۱/۵٪ است.



شکل ۱۷: نتایج آزمون خمش سه نقطه ای مدلسازی شده برای لوله جوشکاری شده بدون نانوذره.

در شکل ۱۸، مقایسه منحنی تنش- کرنش برای دو حالت تجربی و عددی (مدل المان محدود) نیز نشان دهنده همگرایی بالایی بین نتایج عددی و نتایج تجربی است. تنش- کرنش برای مدل عددی و تجربی تا ناحیه رسیدن به بیشینه مقاومت خمشی با هم، همراستا بوده و اختلاف معناداری بین آنها مشاهده نشده است اما بعد از اینکه نمونه وارد فاز تغییر شکل پلاستیک شده است، همگرایی بین این دو منحنی کاهش یافت.



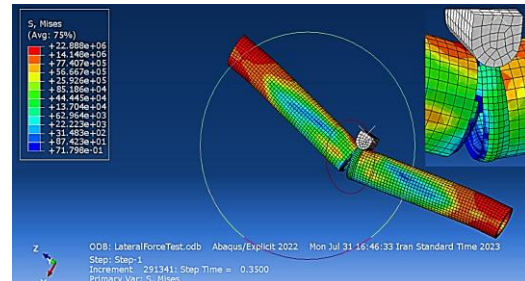
شکل ۱۸: مقایسه منحنی تنش- کرنش برای روش عددی و تجربی برای نمونه بدون نانوذره.

ضد زنگ آستیتی بکار رفته اند مشخص می‌شود که این روکش‌ها باعث افزایش عمق نفوذ می‌گردد که با استفاده از این روش می‌توان از بکار بردن برخی مواد اولیه مانند سیلیسیم و کروم و همچنین فلزات نسبتاً گران قیمت جلوگیری نمود و می‌توان نتیجه گرفت که مؤثرترین روکش‌ها به لحاظ نفوذ جوش شامل مخلوطی از نانوذرات می‌باشد تا اینکه صرفاً روکش‌های اکسیدی مبتنی بر نانوذرات بخواهد در نظر گرفته شود. همچنین در تحقیقی دیگر، با رویکردی ابتکاری و با افزودن مواد فیلر حاوی نانوذرات هیبریدی ZrO_2-TiO_2 به حوضچه جوش در طول جوشکاری، گاز بی‌اثر تنگستن تحت لرزش فراصوتی برای ساخت جوش‌های نانو ساختار انجام شده است حال آنکه در نوعی دیگر، مواد فیلر ساخته شده از آلومینیوم ۶۰۶۱ و TiC که غالباً برای جوشکاری گاز بی‌اثر تنگستن در مواد با پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده است جوش‌های تولید شده با استفاده از مفتول‌های جوشکاری عمل‌آوری شده با نانو که عاری از ترک می‌باشند خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای در شرایط جوش ناتابیده و عملیات حرارتی را نشان داده‌اند. همچنین فیلرهای کامپوزیت $TiC-Al$ ساخته شده از نورد تجمعی برای جوشکاری آلومینیوم نشان داده است که استحکام کششی منطقه جوشکاری دچار بهبود و سختی آن نیز افزایش می‌یابد که نشان دهنده آن است که نانوذره کاربید تیتانیوم سبب کاهش اندازه دانه‌های اولیه در آلومینیوم شده و تنش تسلیم و مقاومت به سختی جوش را افزایش می‌دهد در صورتیکه تأثیر اجزای محتوای تیتانیوم بر خواص مکانیکی در جوشکاری فولادهای کم کربن نشان داده است که خواص کششی و چقرمگی ضربه‌ای قطعات جوش داده شده با افزایش مقدار نانوذرات TiO_2 در روکش الکترودی بهبود می‌یابد.

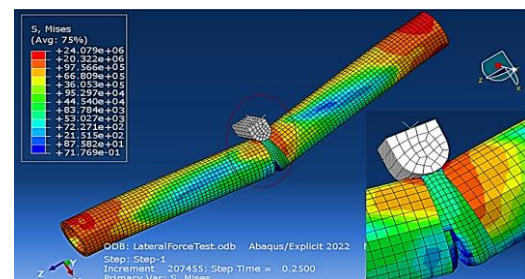
۴- نتیجه‌گیری

در دو بخش آزمون‌های تجربی و مدلسازی عددی یا المان محدود، نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت نانوذره

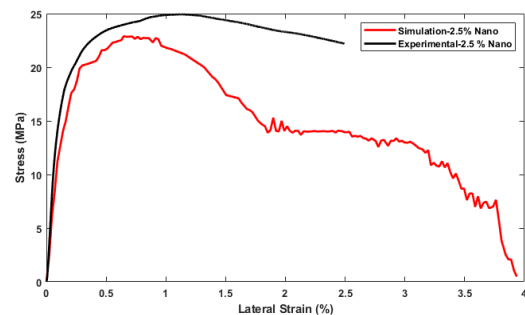
متوسط، خطای مدلسازی برای آزمون خمش سه نقطه‌ای برای لوله‌های جوشکاری شده حاوی نانوذره برابر با $10/42\%$ است.



شکل ۲۱: نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای مدلسازی شده برای لوله‌های جوشکاری شده با $2/5\%$ نانوذره SiO_2 .



شکل ۲۲: نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای مدلسازی شده برای لوله‌های جوشکاری شده با $2/5\%$ نانوذره TiO_2 .



شکل ۲۳: مقایسه منحنی تنش-کرنش برای روش عددی و تجربی برای نمونه حاوی $2/5\%$ نانوذرات.

در این تحقیق، دو روش تجربی و شبیه سازی بکار گرفته شد و نتایج حاصل از این دو روش با یکدیگر مقایسه گردید ولیکن در مقایسه تحقیق جاری نسبت به کارهای مشابه صورت گرفته در گذشته با توجه به تحقیقات قبلی در این حوزه که روکش‌های حاوی نانوذرات مبتنی بر SiO_2 و TiO_2 با ابعاد نانو و مخلوطی از آنها در فلزات با پایه فولاد

مدلسازی شده نیز افزایش می‌یابد. در مجموع، روند تغییرات رفتار خمشی لوله‌های جوشکاری شده حاوی نانوذرات در روش المان محدود تا غلظت ۲/۵٪ با آزمون‌های تجربی هم‌راستا می‌باشد ولی به ازای مقادیر بیش از ۲/۵٪، میزان خطای مدلسازی تجربی افزایش خواهد یافت.

بررسی نتایج نشان داد تأثیر نوع نانوذره بر بیشینه بار خمشی وارده بر لوله جوشکاری شده معنادار نبود اما اثر غلظت نانوذره بر آن در سطح احتمال ۹۹٪ معنادار شد که بیشینه کرنش جانبی به ازای دو عامل غلظت و درصد نانوذره و کمینه کرنش جانبی نیز به ازای ۵٪ جرمی نانوذره SiO_2 مشاهده گردید.

مراجع

- [1] H. Li, C. Zhang, C. Liu, M. Huang, *Surface and Coatings Technology*, **15**, 2019, 158.
- [2] K. Giridharan, P. Sevel, R. Ramadoss, B. Stalin, *Metallurgical Research & Technology*, **119**, 2022, 505.
- [3] V.G. Lisienko, E.M. Shleimovich, *Refractories and Industrial Ceramics*, **54**, 2013, 188.
- [4] M. Poorghorban, M. Yousefieh, E. Borhani, *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, **56**, 2023, 50.
- [5] C. Vimalraj, P. Kah, P. Layus, E.M. Belinga, S. Parshin, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **102**, 2019, 105.
- [6] S. Gaurav, R.S. Mishra, M. Zunaid, *Journal of Adhesion Science and Technology*, **37**, 2023, 3125.
- [7] M. Sabokrouh, B. Khoshshima, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, **8**, 2018, 213.
- [8] A. Kumar, L. Sharma, R. Chhibber, *Ceramics International*, **49**, 2023, 17753.
- [9] K.T. Sunny, N.N. Korra, *Materials Today: Proceedings*, **47**, 2021 Jan 2, 4378.
- [۱۰] حسن شریفی، حسین رفیعی، حمید غیور، مهدی علیزاده، بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات کاربید سیلیسم بر خواص مکانیکی و سطحی نانوکامپوزیت Al/SiCp تولید شده به روش متالورژی پودر، نانومواد، ۴، ۱۳۹۴، ۳۲-۱۳۳.
- [11] D. Stavrov, H.E. Bersee, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **36**, 2005, 39.
- [12] C. Vimalraj, P. Kah, P. Layus, E.M. Belinga, S. Parshin, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **102**, 2019, 105.
- [13] T. Toth, S. Krasnorutskyi, J. Hensel, K. Dilger, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **191**, 2021, 104354.
- [14] D. Oropeza, D.C. Hofmann, K. Williams, S. Firdosy, P. Bordeenithikasem, M. Sokoluk, M. Liese, J. Liu, X. Li, *Journal of Alloys and Compounds*, **834**, 2020, 154987.
- [15] V.B. Rajeswari, S.S. Paramashivan, S. Mohan, S.K. Albert, *High Temperature Materials and Processes*, **39**, 2020, 117.
- [16] M. Kianezhad, A. Honarbakhsh Raouf, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **120**, 2020, 277.
- [17] M. Fattahi, N. Nabhani, M. Hosseini, N. Arabian, E. Rahimi, *Micron*, **45**, 2013, 107.

تأثیر معناداری بر بیشینه مقاومت خمشی لوله های جوشکاری شده دارد اما نوع نانوذره فاقد تأثیر معنادار بر مقاومت خمشی لوله های جوشکاری شده می باشد. نتایج آزمون های تجربی نشان داد که افزوده شدن نانوذرات به فیلرهای جوشکاری سبب افزایش مقاومت خمشی لوله های گاز جوشکاری گردیده به طوری که با افزایش غلظت نانوذره در فیلر، ابتدا میزان مقاومت خمشی افزایش و سپس کاهش می یابد چنانکه به ازای غلظت ۲/۵٪ نانوذره، بالاترین مقاومت خمشی برای هر دو نوع نانوذره مشاهده شد. بررسی نتایج آزمون های کشش نشان داد که نوع نانوذره و غلظت آن در سطح، بر بیشینه مقاومت کششی لوله های جوشکاری شده تأثیر گذار است. همچنین نتایج آزمون های تجربی کشش نشان داد با افزایش غلظت نانوذره در فیلر جوشکاری، ابتدا مقاومت کششی لوله های جوشکاری شده افزایش و سپس کاهش پیدا کرد به طوری که به ازای هر دو نوع نانوذره، بالاترین مقاومت کششی در غلظت ۲/۵٪ مشاهده شد اما مقایسه میانگین ها نشان داد که اثر نانوذرات SiO_2 در بهبود مقاومت کششی لوله های جوشکاری شده بیشتر از نانوذرات TiO_2 می باشد. در مجموع، بررسی آزمون های تجربی نشان داد که مناسب ترین فیلر برای داشتن بیشینه مقاومت خمشی و کششی در لوله های جوشکاری شده، فیلر حاوی ۲/۵٪ نانوذرات SiO_2 است. بررسی مدل های المان محدود برای شبیه سازی آزمون کشش نشان داد که میزان خطای بین نتایج عددی و تجربی برای لوله جوشکاری شده بدون نانوذره، ۱۹٪ است که در این حالت، مقادیر نتایج مدلسازی شده کمتر از نتایج تجربی است. روند تغییرات افزوده شدن نانوذرات به جوش در مدل های المان محدود روندی مشابه نتایج تجربی داشت اما با افزایش غلظت نانوذره به بیش از ۲/۵٪، این روند برعکس شد و در این حالت، نتایج عددی و تجربی همراستا نبودند. مدل های المان محدود جهت شبیه سازی آزمون خمش سه نقطه ای نشان داد که خطای مدلسازی و تجربی برای نمونه بدون نانوذره حدود ۱/۵٪ است اما با افزایش غلظت نانوذره در فرآیند مدلسازی، میزان خطای بین مقدار تجربی و

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **102**, 2019, 105.
- [30] A. Sabik, W. Witkowski, *Journal of Biomechanics*, **157**, 2023, 111736.
- [31] H. Balineni, D.C. Jagarapu, A. Eluru, *Materials Today: Proceedings*, **33**, 2020 Jan 1, 287.
- [32] Y.M. Mater, A.M. El Shahat, S.S. AbdelSalam, *Materials Today: Proceedings*, 2023 Jul 5.
- [33] A. Gupta, J. Singh, R. Chhibber, *Silicon*, **15**, 2023, 3463.
- [34] W.N. Khan, R. Chhibber, *Journal of Pressure Vessel Technology*, **142**, 2020, 031505.
- [35] A. Kumar, R. Chhibber, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2024, 09544054241256273.
- [36] X. Wang, J.P. Dempsey, *Engineering Fracture Mechanics*, **276**, 2022, 108881.
- [37] W. Yuan, J. Zhu, N. Wang, W. Zhang, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **15**, 2023, 1859.
- [38] L. Cheng, G.J. Wagner, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **390**, 2022, 114507.
- [39] U.B. Asim, M.A. Siddiq, M.E. Kartal, *Computational Materials Science*, **161**, 2019, 346.
- [40] C. Leuther, J. Wilmers, S. Bargmann, *Software Impacts*, **26**, 2023, 100534.
- [41] H. Singh, *Mechanics of Materials*, **184**, 104748.
- [42] A. Gupta, J. Singh, R. Chhibber, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **239**, 2025, 167.
- [43] W. Bai, Z. Gong, Y. Li, J. Liu, *Composites Science and Technology*, **234**, 2023, 109946.
- [44] D. Morin, L.E. Dæhli, J. Faleskog, O.S. Hopperstad, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, **16**, 2023, 105051.
- [18] A. Shafiei-Zarghani, S. Kashani-Bozorg, A. Zarei-Hanzaki, *Materials Science and Engineering: A*, **500**, 2009, 84.
- [19] V.G. Lisienko, E.M. Shleimovich, *Refractories and Industrial Ceramics*, **54**, 2013, 188.
- [۲۰] امین عبدالله‌زاده، علی شکوه‌فر، حمید امیدوار، محمدعلی صفرخانیان، محمدرضا نادری، بررسی تاثیر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم بر خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ31 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، ۴، ۱۳۹۵، ۵۵-۷۱.
- [21] R.R. Baridula, R.V. Ramaraju, A.B. Ibrahim, M.F. Ku, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **70**, 2017, 1005.
- [22] M. Fattahi, M. Mohammady, N. Sajjadi, M. Honarmand, Y. Fattahi, S. Akhavan, *Journal of Materials Processing Technology*, **217**, 2015, 21.
- [23] M. Kianezhad, A. Honarbakhsh Raouf, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **120**, 2020, 277.
- [24] S.A. Shirazi, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (IEEE)*, 2012, 1.
- [25] A. Shafiei-Zarghani, S.F. Kashani-Bozorg, A. Zarei-Hanzaki, *Materials Science and Engineering: A*, **500**, 2009, 84.
- [26] S. Ahmadifard, A. Heidarpour, S. Kazemi, *Modares Mechanical Engineering*, **18**, 2018, 219.
- [27] T. Coetsee, F.J. De Bruin, *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*, **17**, 2025, 100160.
- [28] R.R. Baridula, R.V. Ramaraju, A.B. Ibrahim, M.F. Ku, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **70**, 2017, 1005.
- [29] C. Vimalraj, P. Kah, P. Layus, E.M. Belinga, S.M. Parshin,